

## OCENA ADEKWATNOŚCI MODELU OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO OPRACOWANEGO NA POTRZEBY BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH

### THE ADEQUACY OF MARINE DIESEL ENGINE MODEL DEVELOPED FOR DIAGNOSTIC TEST

**Tomasz Kniaziewicz, Marcin Zacharewicz\***

Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Śmidowicza 69, 81–103 Gdynia,  
Wydział Mechaniczno-Elektryczny, e-mail: M.Zacharewicz@amw.gdynia.pl

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono program prowadzenia badań zawierający podstawowe etapy, takie jak: obiekt rzeczywisty (zespół silnik – prądnica), modele: fizyczny oraz matematyczny procesów zachodzących w silniku, opracowanie programu komputerowego, prowadzenie badań modelowych oraz empirycznych dla silnika sprawnego i uszkodzonego oraz ocena adekwatności modelu. Następnie opisano wytypowane parametry wykorzystane do oceny adekwatności modelu w stosunku do silnika. W dalszej części przedstawiono plan badania dla silnika w dwóch stanach zdatności technicznej (silnik sprawny oraz silnik z wyłączonym zasilaniem paliwem cylindra nr 2). Końcowa część artykułu zawiera wyniki przeprowadzonych badań modelowych i empirycznych oraz ich analizę.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, modelowanie, adekwatność.

**Abstract:** The paper presents a research program containing basic stages such as: real object (motor – generator set), models: physical and mathematical processes occurring in the engine, development of a computer program, conducting model and empirical tests for an efficient and damaged engine and assessment of the model's adequacy. Next, the selected parameters used to assess the adequacy of the model in relation to the engine were described. The further part describes the test plan for the engine in two states of technical suitability (efficient engine and engine with cylinder 2 powered off). The final part of the article contains the results of model and empirical research as well as their analysis.

**Keywords:** diagnostics, modeling, adequacy.

## 1. WSTĘP

Większość silników tłokowych o zapłonie samoczynnym stosowanych do napędu prądnic okrętowych nie jest wyposażona w zawory indykatorowe, w związku z czym nie podlegają one strategii eksploatacji według stanu technicznego. Są one eksploatowane według strategii tzw. rezerwu godzinowego, zakładającego wymianę ich podzespołów konstrukcyjnych co ściśle określony czas ich pracy. Jak pokazuje praktyka eksploatacyjna, wymianie podlegają podzespoły często zdadne. Prowadzone badania mają na celu objęcie silników o niskiej podatności diagnostycznej strategią eksploatacji według stanu technicznego [Zacharewicz 2009]. Strategia ta wymaga prowadzenia badań (okresowych lub ciągłych), mających na celu ocenę stanu technicznego wybranych podzespołów silników.

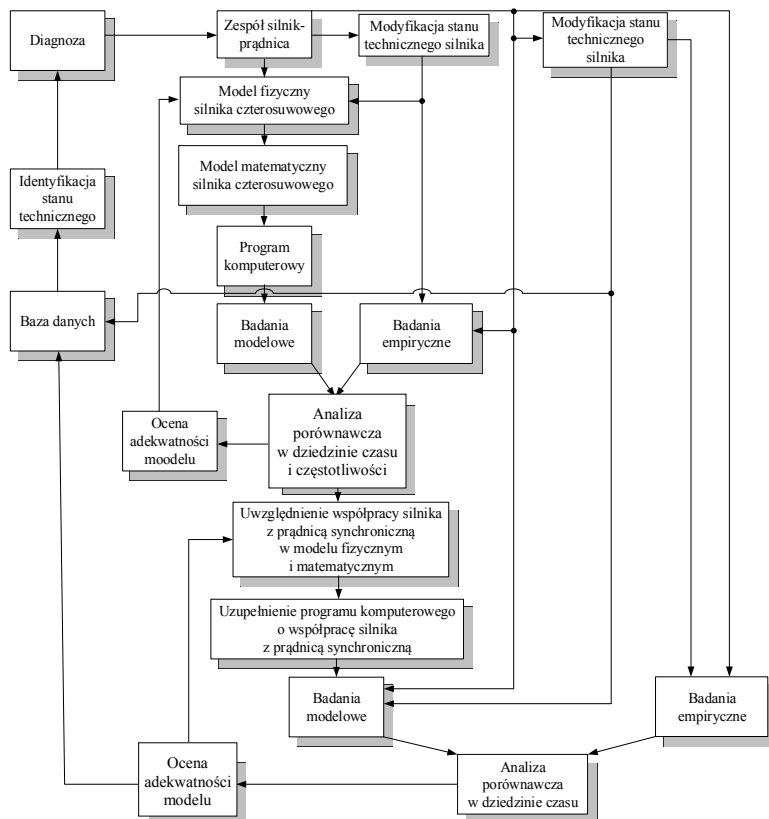
Istnieje więc potrzeba opracowywania bezinwazyjnych, parametrycznych metod oceny stanu technicznego podzespołów konstrukcyjnych silników. Jedną z takich metod jest ocena stanu technicznego przestrzeni roboczych silnika tłokowego na podstawie pomiarów pulsacji ciśnienia spalin w kanale wylotowym, opracowana przez zespół Korczewski–Zacharewicz [Korczewski i Zacharewicz 2007; Zacharewicz 2009]. Metoda ta ma ograniczenia, polegające na konieczności modyfikacji struktury konstrukcyjnej silnika (w niektórych przypadkach), umożliwiającej dostęp do wnętrza kanałów spalin wylotowych, które często są chłodzone tzw. płaszczem wodnym. Dodatkowo metoda ta może być stosowana do silników doładowanych.

Inną metodą oceny stanu technicznego silników o ograniczonej podatności kontrolnej [Zacharewicz i Cwalina 2011a, b; 2012; 2013, Zacharewicz, Cwalina i Kniaziewicz 2015a, b] jest opracowana przez autorów artykułu metoda polegająca na ocenie procesu roboczego okrętowego silnika pomocniczego (napędzającego prądnicę synchroniczną) na podstawie pomiarów wartości napięć międzyfazowych prądnicy. Podstawą opracowania metody było założenie, że stan techniczny silnika (realizowanych w nim procesów) ma wpływ na fluktuację prędkości obrotowej wału korbowego silnika (w czasie trwania cyklu roboczego). Fluktuacje prędkości wału korbowego powodują odkształcenia przebiegów napięcia międzyfazowego prądnicy napędzanej silnikiem. W związku z tym przebiegi napięcia międzyfazowego prądnicy zawierają informację o stanie technicznym silnika. Metoda ta z oczywistych względów ogranicza się tylko i wyłącznie do silników stanowiących napęd prądnic okrętowych.

## 2. PROGRAM REALIZACJI BADAŃ

Pierwszym etapem badań nad metodą oceny stanu technicznego zespołu spalinowo-elektrycznego było opracowanie programu prowadzenia badań. Został on

przedstawiony za pomocą algorytmu zawierającego wszystkie przewidywane etapy [Korczewski i Zacharewicz 2007] (rys. 1).



Rys. 1. Program prowadzenia badań

Fig. 1. Research program

Zgodnie z zaproponowanym programem obiektem badań jest zespół spalinowo-elektryczny napędzany czterosuwowym silnikiem o zapłonie samoczynnym. Na jego podstawie opracowano model fizyczny [Zacharewicz i Cwalina 2013] oraz bazujący na nim model matematyczny [Zacharewicz i Kniaziewicz 2016]. Obydwa modele posłużyły opracowaniu programu komputerowego, pozwalającego na rozwiązywanie równań modelu.

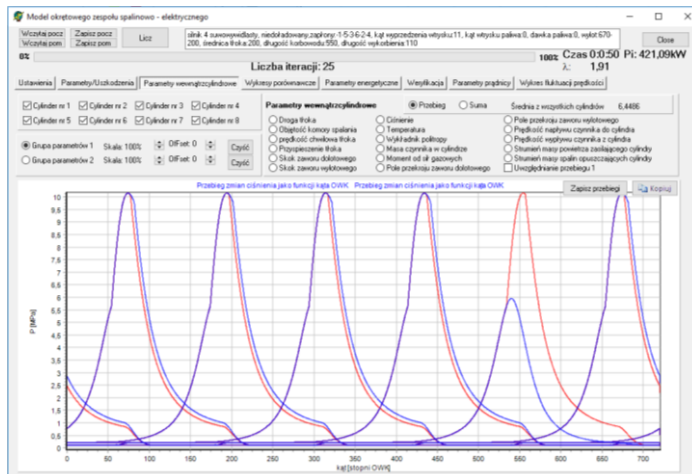
W programie badań opracowanie modelu matematycznego podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap dotyczył opracowania modelu silnika oraz przeprowadzenia jego oceny adekwatności. Po zakończeniu tego etapu uzupełniono opracowany model o współpracującą z silnikiem prądnicę synchroniczną. Parametrami

wejściowymi do modelu są parametry struktury konstrukcyjnej silnika, jego obciążenie momentem oporu oraz stan techniczny. Parametry wyjściowe stanowią przebiegi parametrów czynnika wewnątrz jego cylindrów, fluktuacje prędkości kątowej wału korbowego oraz przebiegi napięć międzyfazowych prądnicy, będące funkcją kąta obrotu wału korbowego lub czasu.

Zarówno w przypadku modelu silnika, jak i zespołu spalinowo-elektrycznego prowadzono badania empiryczne oraz modelowe mające na celu ocenę jego adekwatności. Wszystkie badania (modelowe i empiryczne) zrealizowano według tego samego planu badania. Uzyskanie założonej adekwatności modelu silnika było warunkiem pozwalającym na rozpoczęcie opracowywania modelu zespołu. Wszystkie wyniki badań (zarówno modelowe, jak i empiryczne) były gromadzone w bazie danych. Powinno to w przyszłości pozwolić na identyfikację stanu technicznego silnika w konsekwencji na postawienie diagnozy.

### 3. MODEL SILNIKA

Zgodnie z zaproponowanym planem prowadzenia badań (rys. 1) dokonano identyfikacji struktury konstrukcyjnej obiektu badań oraz na tej podstawie opracowano model fizyczny [Zacharewicz i Cwalina 2013]. Stanowił on podstawę do opracowania modelu matematycznego [Zacharewicz i Kniaziewicz 2016]. Równania modelu matematycznego zostały zaimplementowane w programie komputerowym (rys. 2).



Rys. 2. Jeden z paneli programu komputerowego

Fig. 2. One of the computer program panels

W modelu oraz w programie uwzględniono możliwość symulowania wybranych uszkodzeń silnika, takich jak:

- zmiany dawki paliwa doprowadzanego do cylindra;
- zanieczyszczenia (zmiany pola przekroju) zaworów dolotowych i wylotowych;
- zmiany średnicy otworków wtryskiwacza (zanieczyszczenie końcówki wtryskiwacza);
- nieszczelności w zespole tłok – pierścienie – cylinder;
- zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku.

Dodatkowo, opracowując model matematyczny i program komputerowy, uwzględniono możliwość modyfikacji struktury konstrukcyjnej silnika, przez co można by przeprowadzić symulację praktycznie dowolnego czterosuwowego silnika okrętowego o zapłonie samoczynnym.

Ocenę adekwatności opracowanego modelu matematycznego przeprowadzono na podstawie analizy porównawczej wytypowanych parametrów pracy silnika, uzyskanych w wyniku badań empirycznych oraz modelowych. Zarówno badania empiryczne, jak i modelowe zostały wykonane dla silnika okrętowego SULZER typu 6AL20/24. Do oceny adekwatności wykorzystano parametry jak:

- współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ ;
- godzinowe zużycie paliwa  $G_e$ ;
- wartość maksymalnego ciśnienia indykowanego  $p_{max}$ ;
- parametr charakteryzujący podobieństwo przebiegów indykatorowych  $K$ .

Do opracowania parametru  $K$  konieczne było obliczenie przebiegów zmiany pól powierzchni pod wykresami indykatorowymi jako funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika według zależności:

$$S_1 = \int_0^{720} p_{SCmodel}(\alpha) d\alpha \quad \text{oraz} \quad S_2 = \int_0^{720} p_{SCpomiar}(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

gdzie  $S_1, S_2 = f(\alpha)$  – pola powierzchni pod wykresami przebiegów ciśnienia indykowanego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego, uzyskane w wyniku rozwiązania równań modelu oraz badań empirycznych.

Wartość miary adekwatności  $K$  obliczono na podstawie zależności:

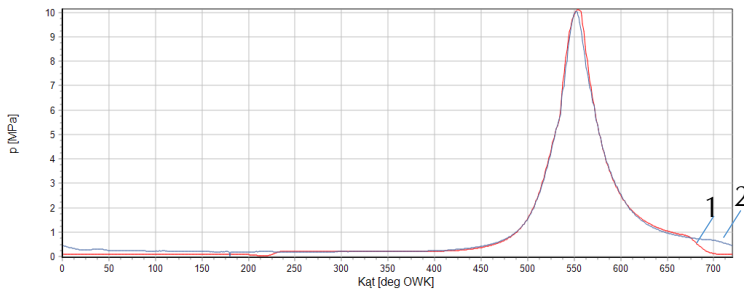
$$K = 100\% - \frac{S_1 \cdot 100\%}{S_2} \quad (2)$$

gdzie  $K$  jest funkcją kąta obrotu wału korbowego.

Przebieg wartości parametru  $K$  pokazano na rysunku 5. Ze względu na fakt, że największa siła parcia gazów występuje, gdy ciśnienie  $p_{SC}$  jest największe, zdecydowano się wykorzystać do analizy adekwatności modelu ograniczony zakres wartości kątów obrotu wału korbowego, poczynając od kąta początku wtrysku,

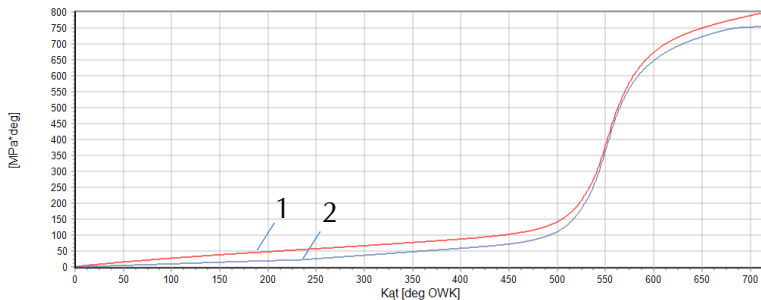
aż po kąt otwarcia zaworu wylotowego. Założono, że poziomem odniesienia będzie wartość wskaźnika  $K$ , obliczona dla kąta początku wtrysku, natomiast odchylenia od tej wartości o więcej niż 10 świadczą o niewystarczającej adekwatności modelu.

Przykładowy przebieg ciśnienia indykowanego, uzyskany w wyniku rozwiązywania równań modelu matematycznego oraz badań empirycznych, został pokazany na rysunku 3, natomiast przebieg zmian pola powierzchni pod przebiegami indykatorowymi jako funkcja czasu został pokazany na rysunku 4.



**Rys. 3.** Przebiegi ciśnienia czynnika: 1 – uzyskany z modelu, 2 – zmierzony jako funkcje kąta obrotu wału korbowego

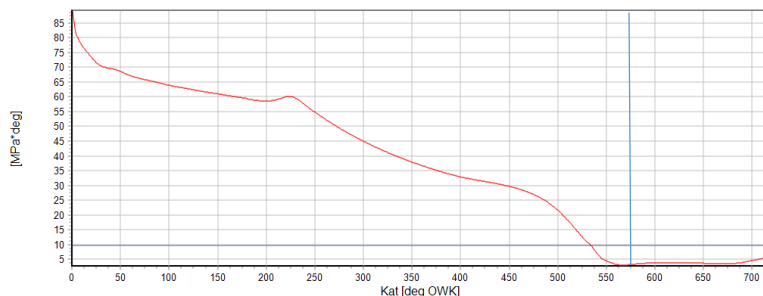
**Fig. 3.** Pressure cycles of the medium: 1 – obtained from the model, 2 – measured as functions of the angle of rotation of the crankshaft



**Rys. 4.** Przebiegi całkowe ciśnienia czynnika: uzyskanego z modelu – 1 i zmierzonego – 2 jako funkcje kąta obrotu wału korbowego

**Fig. 4.** Integral pressure of the medium: obtained from the model – 1 and measured – 2 as functions of the angle of crankshafts rotation

Następnie obliczono różnicę pomiędzy przebiegami, którą pokazano na rysunku 5.



**Rys. 5.** Przebieg parametru  $K$  jako funkcja kąta obrotu wału korbowego

**Fig. 5.** The course of parameter  $K$  as a function of the angle of rotation of the crankshaft

Uznano, że model matematyczny silnika można uznać za adekwatny w zakresie następujących wartości przyjętych parametrów. W przypadku współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  przyjęto, że jego wartość względna nie powinna różnić się w przypadku modelu o więcej niż 20% w stosunku do silnika rzeczywistego. Różnica wartości względnej godzinowego zużycia paliwa  $G_e$  powinna być mniejsza od 10%, natomiast różnica maksymalnej wartości ciśnienia indykowanego nie powinna przekraczać 5%. W przypadku parametru  $K$  jego wartość bezwzględna nie powinna przekraczać 10.

#### 4. PLAN BADANIA

Zgodnie z praktyką prowadzenia badań doświadczalnych wyróżnia się trzy ich etapy, tzn. planowanie doświadczenia, jego realizację oraz analizę wyników [Mańczak 1976; Hebda, Niziński i Pelc 1980; Polański 1984]. W przypadku oceny adekwatności opracowanego modelu matematycznego zdecydowano się (zgodnie z zaproponowanym programem realizacji badań przedstawionym na rysunku 1) na prowadzenie badań zarówno modelowych, jak i empirycznych według tego samego planu.

Zgodnie z zaprezentowanym na rysunku 1 programem realizacji badań analiza wyników umożliwi podjęcie decyzji, czy opracowany model matematyczny jest adekwatny w założonym przez badacza stopniu. W przypadku osiągnięcia zadowalającej (ustalonej przez badacza) adekwatności modelu przechodzi się do dalszej części, w tym przypadku do modelowania przebiegu napięcia międzyfazowego trójfazowej prądnicy synchronicznej. W sytuacji zbyt niskiej adekwatności modelu matematycznego wraca się do etapu modelowania, zmieniając poziom zastosowanych uproszczeń oraz dobierając współczynniki dla procesów, takich jak przepływy (współczynnik wypływu spalin oraz napływu powietrza).

Plan badania uwzględnia prowadzenie badań w stanie pełnej zdatości technicznej (tab. 1) oraz w stanie częściowej zdatości, polegającej na wyłączeniu z pracy jednego z cylindrów silnika (tab. 2).

W przypadku prowadzenia badań dla silnika uszkodzonego zdecydowano się na ograniczenie planu badania do wartości momentu wynoszącej 3,7 kNm. Wynika to z faktu, że w sytuacji symulowanego uszkodzenia silnik nie był w stanie osiągnąć punktów pomiarowych nr 18, 19 i 20.

**Tabela 1.** Plan eksperymentu dla silnika w stanie pełnej zdatości technicznej

**Table 1.** Experiment plan for the engine in a state of full technical suitability

Numer pomiaru	5,12					20
	4,2				18	19
	3,7			15	16	17
	2,96		11	12	13	14
	2,2	6	7	8	9	10
	Luz	1	2	3	4	5
$M_{OP}$ [kNm]	400      500      600      700      750					
$n$ [min <sup>-1</sup> ]						

**Tabela 2.** Plan eksperymentu dla silnika w stanie częściowej zdatości technicznej

**Table 2.** Experimental plan for the engine in partial technical condition

	3,7			15	16	17
	2,96		11	12	13	14
	2,2	6	7	8	9	10
	Luz	1	2	3	4	5
$M_{OP}$ [kNm]	400      500      600      700      750					
$n$ [min <sup>-1</sup> ]						

## 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Zestawienie wyników badań modelowych oraz empirycznych (dla silnika w stanie pełnej zdatości technicznej) zgrupowano w tabeli 3, natomiast wartości względne oraz miara  $K$  zostały zestawione w tabeli 4.



Tabela 3. Wyniki badań modelowych oraz empirycznych dla silnika sprawnego

Table 3. The results of model and empirical tests for the efficient engine

5,12	$N_i$ $p_{scmax}$ $G_e$ $\lambda$	20						438	438,1
		Badania empiryczne						10,52	10,75
4,2	$N_i$ $p_{scmax}$ $G_e$ $\lambda$	Badania empiryczne						19	367,5
		Badania modelowe						333	366
3,7	$N_i$ $p_{scmax}$ $G_e$ $\lambda$	Badania empiryczne						18	10,48
		Badania modelowe						10,06	10,5
2,96	$N_i$ $p_{scmax}$ $G_e$ $\lambda$	Badania empiryczne						16	1289
		Badania modelowe						1201	2,0
2,2	$N_i$ $p_{scmax}$ $G_e$ $\lambda$	Badania empiryczne						15	355,7
		Badania modelowe						328	355
Luz	$N_i$ $p_{scmax}$ $G_e$ $\lambda$	Badania empiryczne						14	9,28
		Badania modelowe						9,33	10,52
M <sub>op</sub> [kNm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						17	1,97
		Badania modelowe						329,5	2,07
400	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						13	273,6
		Badania modelowe						253,8	8,5
700	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						14	8,5
		Badania modelowe						8,5	8,68
600	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						9	971
		Badania modelowe						882	2,0
500	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						10	211,3
		Badania modelowe						189,2	7,65
400	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						10	834
		Badania modelowe						776	2,14
750	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Badania empiryczne						5	85,0
		Badania modelowe						80,4	5,06

**Tabela 4.** Wartości względne miar adekwatności modelu dla silnika sprawnego

**Table 4.** Relative values of model adequacy measures for a functional engine

5,12	$p_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%] $K$ [-]				<b>20</b>		2,19 6,05 0,00 2,17		
4,2	$p_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%] $K$ [-]					<b>18</b>	0,20 8,08 2,06 4,64	<b>19</b> 0,19 766 3,09 3,80	
3,7	$p_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%] $K$ [-]	Przekroczenia wartości miar			<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b> 0,72 4,96 7,69 8,16	0,54 3,32 2,70 4,76	4,13 8,04 4,83 5,02
2,96	$p_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%] $K$ [-]		<b>11</b>	4,32 0,29 0,55 4,14	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b> 4,14 1,99 8,00 8,9	2,07 1,34 6,34 8,19	2,07 4,18 2,44 4,27
22	$p_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%] $K$ [-]	<b>6</b>	4,73 3,67 1,69 5,10	<b>7</b>	2,76 4,12 8,25 5,43	<b>8</b>	<b>9</b>	0,65 6,06 18,10 3,51	<b>10</b> 2,55 2,96 2,80 3,27
Luz	$p_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%] $K$ [-]	<b>1</b>	3,60 <b>113,00</b>	<b>2</b>	1,90 <b>30,00</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b> 5,99 <b>10,01</b> 2,58 6,97 11,74 1,70	0,98 3,78 3,08 3,80
$M_{OP}$ [kNm] $n$ [min <sup>-1</sup> ]		400	500	600	700	750			

W przypadku badań prowadzonych dla silnika sprawnego zdecydowano się na uznanie modelu matematycznego za adekwatny, pomimo przekroczenia wartości miar adekwatności w pracy silnika bez obciążenia momentem oporu (zostały wyróżnione w tabeli 4). Takie podejście wynika z faktu, że model został zoptymalizowany (dobre założenia upraszczające oraz współczynniki przepływu) dla pracy silnika z obciążeniem nominalnym momentem oporu oraz przy nominalnej prędkości obrotowej wału korbowego. Jest to uzasadnione faktem, że silniki pomocnicze pracują przez większość czasu pod obciążeniem momentem oporu generowanym

przez prądnice. Dodatkowo należy mieć na względzie fakt, że średnia prędkość obrotowa wału korbowego silnika napędzającego prądnicę zmienia się w bardzo wąskim zakresie (ze względu na konieczność wytwarzania energii elektrycznej o założonej częstotliwości 50 lub 60 Hz). Ponadto w czasie pracy silnika bez obciążenia momentem oporu występuje wiele czynników, które mają wpływ na dokładność zrealizowanych pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Do najistotniejszych należy zaliczyć:

- niepowtarzalność cyklu roboczego zwłaszcza dla niskich wartości obciążenia momentem oporu;
- zakłócenia powodowane przez kanały przepływowe zaworów indykatorowych (występowanie zjawisk falowych) [Lus i Łutowicz 2013; Łutowicz 2013]. Kanały te dobierane są w taki sposób, aby zapewniać wiarygodne pomiary ciśnienia indykowanego dla silnika pracującego z nominalną prędkością obrotową i dla nominalnego obciążenia momentem oporu;
- duża długość kanałów wylotu spalin powodująca opóźnienia w rejestracji współczynnika nadmiaru powietrza;
- niska dokładność przyrządu wagowego zastosowanego do pomiaru godzinowego zużycia paliwa (w zakresie pracy silnika bez obciążenia). Przyrząd ten został dobrany w taki sposób, aby zapewniać możliwość realizacji pomiarów dla całego zakresu dopuszczalnych dla silnika prędkości obrotowych wału korbowego oraz obciążeń momentem oporu;
- okrętowe tłokowe silniki spalinowe charakteryzują się dużą niepowtarzalnością parametrów pracy poszczególnych cylindrów. Jest to spowodowane różnicami w wykonaniu elementów aparatury paliwowej (dawka paliwa dobierana jest dla nominalnych warunków pracy silnika), tulei cylindrowych głowic oraz szeregu innych elementów (61).

W przypadku badań dla silnika w stanie częściowej zdadności technicznej zdecydowano się na ograniczenie zestawu miar (wylimitowano miarę podobieństwa przebiegów ciśnienia indykowanego  $K$ ). Spowodowane to było znacznymi rozbieżnościami pomiędzy zmierzonymi przebiegami ciśnienia indykowanego z poszczególnych cylindrów silnika.

W przypadku maksymalnej wartości ciśnienia indykowanego  $p_{SCmax}$  jego wartość obliczono jako średnią ze wszystkich sprawnych cylindrów silnika.

Zestawienie wyników badań dla silnika z symulowanym stanem niezdatności technicznej przedstawiono w tabeli 5, natomiast wartości względne miar podano w tabeli 6. Szare tło oznacza wyniki badań empirycznych, natomiast białe przewidziano dla wyników badań modelowych.

**Tabela 5.** Wartości względne miar adekwatności modelu dla silnika sprawnego**Table 5.** Relative values of model adequacy measures for a functional engine

Numer pomiaru	3,7	$P_{SCmax}$ $G_e$ $\lambda$					10,1 321 1,62	10,5 334 1,54	10,1 369 1,41	10,5 366 1,52	10,3 392 1,63	10,8 395 1,58		
	2,96	$P_{SCmax}$ $G_e$ $\lambda$					8,33 183 1,35	8,3 199 1,45	9,50 253 1,56	9,87 259 1,47	9,75 280 1,60	10 283 1,53	9,11 303 1,59	9,51 303 1,6
	2,2	$P_{SCmax}$ $G_e$ $\lambda$	7,8 132 1,42	8,1 138 1,44	8,1 159 1,56	8,45 158 1,68	8,11 179 1,81	8,1 182 1,99	8,07 207 1,92	8,30 209 2,09	8,11 228 1,81	8,49 235 1,83		
	Luz	$P_{SCmax}$ $G_e$ $\lambda$	5,27 128 3,4	4,982 64 4,8	5,272 01 3,79	5,32 231 3,34	5,42 275 3,35	5,21 217 3,24	5,57 352 2,82	5,65 345 3,09	5,63 91 2,72	5,653 82 2,91		
$M_{OP}$ [kNm]														
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]		400		500		600		700		750				

**Tabela 6.** Wartości względne miar adekwatności modelu dla silnika uszkodzonego**Table 6.** Relative values of model adequacy measures for a damaged engine

Numer pomiaru	3,7	$P_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%]	Przekroczenia wartości miar		4,06 4,05 4,94	3,85 0,81 7,80	4,95 0,77 3,07				
	2,96	$P_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%]			0,36 8,74 7,41	3,89 2,37 5,77	2,66 1,07 4,38	4,39 0 0,63			
	2,2	$P_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%]	3,80 4,55 1,41	4,32 0,628 7,69	0,12 1,68 9,94	2,85 0,97 8,85	4,64 3,07 1,10				
	Luz	$P_{SCmax}$ [%] $G_e$ [%] $\lambda$ [%]	5,5 106,25 41,18	0,95 14,93 11,87	8,67 20,81 3,28	1,43 3,13 9,57	0,89 2,30 6,99				
$M_{OP}$ [kNm]											
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]		400		500		600		700		750	

Podobnie jak w przypadku analizy adekwatności modelu silnika sprawnego, tak i w sytuacji silnika uszkodzonego wartości miar adekwatności przekraczają założone granice dla silnika pracującego bez obciążenia momentem oporu. Przyczyny takiego stanu są takie same jak w przypadku silnika sprawnego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych zgrupowanych w tabelach: 8 dla stanu pełnej zdadności technicznej oraz 10 dla stanu częściowej zdadności technicznej stwierdzono, że opracowany model jest adekwatny w granicach prowadzonych badań, czyli dla wszystkich obciążeń z wyjątkiem pracy na biegu luzem. W przypadku pracy silnika nieobciążonego nie ma możliwości jednoznacznej oceny przyczyny nieadekwatności (podobnie jak to miało miejsce w przypadku silnika sprawnego). Jej źródłem mogą być zarówno przyjęte w modelu założenia upraszczające, jak i obciążone błędami wyniki pomiarów parametrów pracy silnika.

W wyniku prowadzonych badań uznano, że częściowa adekwatność opracowanego modelu jest wystarczająca do przejścia do dalszego etapu planu realizacji badań (opracowania modelu zespołu silnik – prądnica synchroniczna). Wynika to z faktu, że silniki pomocnicze (napędzające prądnice) praktycznie nie pracują bez obciążenia momentem oporu.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI DALSZYCH PRAC

Uzyskane wyniki prowadzonych badań modelowych oraz empirycznych pozwalają na uznanie modelu za adekwatny w ograniczonym zakresie. Przekroczenie przyjętych wartości miar miało miejsce dla silnika pracującego bez obciążenia momentem oporu (przypadek praktycznie nieistotny w przypadku badań zespołu spalinowo-elektrycznego). W związku z tym uznano, że model ten może być podstawą prowadzenia prac nad modelem matematycznym zespół silnik – prądnica.

## LITERATURA

- Hebda, M., Niziński S., Pelc, H., 1980, *Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych*, WKiŁ, Warszawa.
- Korczewski, Z., Zacharewicz, M., 2007, *Diagnostyka symulacyjna układu turbodoładowania okrętowego łukowego silnika spalinowego*, Zeszyty Naukowe AMW w Gdyni, nr 2(169).
- Lus, T., Łutowicz, M., 2013, *Effect of Loss of Cylinder Pressure Indicating Channel Patency on Parameters Values Obtained from Indicating Graph*, Hydrographic Institute of the Republic of Croatia, Split, Croatia.
- Łutowicz, M., 2013, *Reverse IIR Filter as a Tool for Cylinder Indicating Channel Patency Impact Correction on Measured Cylinder Pressure Waveform*, Journal of KONES, vol. 20, no. 2.
- Mańczak, K., 1976, *Planowanie eksperymentu*, WNT, Warszawa.
- Polański, Z., 1984, *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa.
- Zacharewicz, M., 2009, *Metoda diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego na podstawie parametrów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę*, rozprawa doktorska, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Gdynia.
- Zacharewicz, M., Cwalina, A., 2011a, *Preliminary Investigations of a Generating Set of the Ship's Power Station in the Aspect of Diagnosing Selected Parts of its Construction al Structure*, Combustion Engines, PTNSS, 2011, vol. 4.
- Zacharewicz, M., Cwalina, A., 2011b, *The Conception of Diagnosis in Auxiliary Diesel Engine at Limited Monitoring Susceptibility in Automated Ship Power Plant*, Polish Journal of Environmental Studies, Hard Olsztyn, vol. 20, no. 5A.
- Zacharewicz, M., Cwalina, A., 2012, *Conception and Practical Application of a Measuring Device for Energetic Parameters Measurement of a Mechatronic Object*, Solid State Phenomena, Trans. Tech. Publications, vol. 180.
- Zacharewicz, M., Cwalina, A., 2013, *Research on Energetic Processes in a Marine Diesel Engine Driving a Synchronous Generator for Diagnostic Purposes PART I. Physical Model of the Processes*, Journal of Polish CIMAC, PG, vol. 8, no. 1.

- Zacharewicz, M., Cwalina, A., Kniaziewicz, T., 2015a, *Assessment of Technical Condition of Marine Auxiliary Diesel Engine on the Basis of Electrical Measurements of Synchronous Generator*, *Cobustion Engines*, R. 54.
- Zacharewicz, M., Cwalina, A., Kniaziewicz, T., 2015b, *Problems of Mathematical Modeling of the Marine Diesel Engine Working Cycle for the Diagnostic Purposes*, *Solid State Phenomena*, vol. 236.
- Zacharewicz, M., Kniaziewicz, T., 2016, *Research on Energetic Processes in a Marine Diesel Engine Driving a Synchronous Generator for Diagnostic Purposes. Part 2 – Mathematical Model of the Processes*, *Journal of Polish CIMEEAC*, PG, vol. 11, no. 1.